

JP3148189

Title:

STABILIZING DEVICE OF OSCILLATION FREQUENCY OF SEMICONDUCTOR LASER

Abstract:

PURPOSE: To realize high stability of frequency and set accuracy by carrying out frequency conversion of a frequency of beat signal by local signal, by applying phase continuous frequency modulation to a standard signal for frequency modulation of reference beam and by detecting error signal synchronously by using detection light branched from the reference beam. **CONSTITUTION:** A frequency of a beat signal BT is converted by a local signal by a mixer 42 of a frequency conversion part 40 and phase thereof is compared with that of a standard signal SS at an offset lock signal generation part 50; and an offset lock signal is thereby detected and fed back to a reference beam frequency variable oscillator 20. Phase continuous frequency modulation is applied to the standard signal SS by a repetition signal RS which is supplied by a modulation signal oscillator 71 and a frequency of output light of a reference laser 21 is modulated through the offset lock signal. Meanwhile, an error signal ES is synchronously detected by the repetition signal RS by a synchronous wave detecting means 62 through an optical synthesizing and analyzing means 31 and an optical frequency recognizing means 61 by repetition signal RS using a detection light DLD containing output light of the reference laser 21 and fed back to a stabilized photo frequency variable oscillator 10. Thereby, oscillation frequency can be stabilized accurately.

⑯日本国特許庁 (JP) ⑰特許出願公開
 ⑱公開特許公報 (A) 平3-148189

⑯Int.Cl.⁵ 識別記号 庁内整理番号 ⑰公開 平成3年(1991)6月24日
 H 01 S 3/133 6940-5F
 H 04 B 10/04 8523-5K H 04 B 9/00 S
 審査請求 未請求 請求項の数 1 (全16頁)

⑲発明の名称 半導体レーザの発振周波数安定化装置

⑳特 願 平1-286651
 ㉑出 願 平1(1989)11月2日

㉒発明者 石田 修 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内
 ㉓発明者 鳥羽 弘 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内
 ㉔出願人 日本電信電話株式会社 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号
 ㉕代理人 弁理士 志賀 正武

明細書

1. 発明の名称

半導体レーザの発振周波数安定化装置

2. 特許請求の範囲

半導体レーザにより構成される被安定化光周波数可変発振器の出力である被安定化光の光周波数を、誤差信号の入力により所定の値に安定化する半導体レーザの発振周波数安定化装置において、
 (a)オフセットロック信号の入力により光周波数が前記被安定化光の光周波数に対して所定の周波数差となるように制御された参照光を供給する参照レーザにより構成される参照光周波数可変発振器と、

(b)前記被安定化光と前記参照光とを入射して、両光の混合光と、被安定化光と、少なくとも参照光の一部を含む検出光とを出力する光合分波手段と、

(c)前記混合光の入力から光電変換によりビート信号を検出するビート信号検出手段と、

(d)所定周波数の局発信号を供給する局部発振器

と、該局発信号を用いて前記ビート信号の入力から中間周波数信号を発生するミキサとからなる少なくとも1段の周波数変換部と、

(e)所定周波数の基準信号を供給する基準発振器と、該基準信号と前記中間周波数信号の入力とを比較して両信号の位相差を出力する位相比較手段と、前記位相差の入力によりオフセットロック信号を出力するループフィルタとからなるオフセットロック信号発生部と、

(f)前記局部発振器と前記基準発振器の少なくともいずれか一つに位相連続周波数変調を施すための所定周期の繰り返し信号を供給する変調信号発振器と、

(g)前記検出光の入力により該検出光に含まれる光周波数成分に応じた強度の検出信号を発生する光周波数弁別手段と、該検出信号中より前記繰り返し信号を用いて誤差信号を検出する同期検波手段とからなる誤差信号発生部と、

を具備することを特徴とする半導体レーザの発振周波数安定化装置。

3. 発明の詳細な説明

「産業上の利用分野」

本発明は、光周波数可変(あるいは波長可変)半導体レーザの発振周波数を、任意の光周波数値に、かつ高い精度で安定化することができる半導体レーザの発振周波数安定化装置に関するものである。

「従来の技術」

光ファイバの持つ広い周波数帯域を有効に利用出来る光周波数多重(光FDM)通信方式や、光共振器や光干渉計の精密な特性評価、高い精度での物質の分光分析等においては、発振光周波数が安定で、かつ広い光周波数可変範囲を有する光周波数可変発振器が必要である。光周波数可変範囲に関しては、既に近年の光通信用波長可変半導体レーザに関する活発な研究により、単一光周波数で発振し、かつ100GHzを上回る広い光周波数可変範囲を有する光周波数可変発振器が、多電極DFB(分布帰還形)レーザや多電極DBR(分布反射形)レーザ等で実現されるに至っている(例えば、K. Kobayashi and I. Mito, "Single

- 3 -

度安定化装置のみならず、受信光との光周波数差を検出して一定値となるように制御する自動周波数制御回路(ADC)や、光周波数基準によってその絶対値を安定化する回路を用いて、相対的もしくは絶対的な光周波数揺らぎを、長時間でも数MHz以内に抑える工夫がなされている。なお、光周波数基準としては、ファブリーペロー干渉計の透過特性や、原子・分子気体の吸収スペクトル等が利用されている(例えばY. C. Chung et al., "Novel FSK Heterodyne Single-Filter Detection System Using No IF Frequency Lock", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol.1, pp.140-141, 1989参照)。したがって、前述した様な広い周波数可変幅を有する半導体レーザを、例えば光FDM通信へ応用する場合には、その発振周波数を、変化可能な光周波数領域内において、任意の周波数値に数MHz以下程度の高い周波数安定度で安定化する工夫が必要となる。

このような、広い周波数設定範囲と高い周波数安定度とを両立させるために、K. Kubokiらは、

Frequency and Tunable Laser Diodes", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.LT-6, pp.1623-1633, 1988参照)。この場合、光の周波数は、一般にレーザの電極に注入される電流値を変化させることによって制御される。

しかしながら、一般に、DFBレーザやDBRレーザといった半導体レーザの発振光周波数の安定度は劣悪である。これは、半導体レーザの発振光周波数が、レーザ自身の温度によっても変化するためで、典型的な感度は10~20GHz/Kである。半導体レーザを発振させるための電流注入には発熱が伴うため、例えば温度検出器とベルチエ素子を利用した温度安定化装置により、注意深く温度を制御した場合においてもなお、1ms程度の短時間で1MHz以上、1分以上といった長時間では数十から数百MHzもの周波数揺らぎが残ってしまう。

これらの周波数揺らぎは、例えば光ヘテロダイン通信をおこなう際に大きな障害となる。このため、例えば局部発振光供給用半導体レーザは、温

- 4 -

2台の半導体レーザの光周波数差を、周波数オフセットロックングと呼ばれる方法で相対的に安定化し、かつ一方のレーザの発振周波数をファブリーペロー共振器に安定化する方法を提案している(K. Kuboki and M. Ohtsu, "Frequency Offset Locking of AlGaAs Semiconductor Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.QE-23, pp.388-394, 1987参照)。以下、図面を用いてこの従来例を説明する。

第2図は、上述した方法を適用した従来の半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示す図である。被安定化レーザ111および参照レーザ121は、それぞれ温度制御装置112および122により温度安定化され、発振光周波数ゆらぎは1時間当たり20MHz程度にまで抑えられている。また、それぞれのレーザの出射光は、光アイソレータ113および123を介して取り出され、反射戻り光によって発振光周波数が乱されたり、発振状態が不安定になることを防いでいる。半導体レーザの発振光周波数は、注入電流によっ

て $1 \text{ GHz}/\text{mA}$ 程度の割合で変化するので、注入電流制御装置 114 および 124 への入力信号によって、それぞれの半導体レーザの発振光周波数が制御される。すなわち、第 2 図中に一点鎖線で囲んで示した半導体レーザ及びその周辺要素により、被安定化光周波数可変発振器 110 および参照光周波数可変発振器 120 が構成されている。

この被安定化光周波数可変発振器 110 の出力である被安定化光 1d と、参照光周波数可変発振器 120 の出力である参照光 1d は、光合分波手段 131 に入力される。被安定化光 1d からビームスプリッター 131a で、また参照光 1d からビームスプリッター 131b で、それぞれ被安定化光出力と検出光 1d とが分岐出力され、さらにそれぞれの他の分岐光がビームコンバイナー 131c で合波されて、混合光 1d が output される。この混合光 1d を受光器 132 に入射して光電変換を施すことにより、被安定化光 1d と参照光 1d の光周波数差で電気的に振動するビート信号 bt が検出される。ここで検出可能な差周波数の上限は、現在の

半導体フォトダイオードを用いた場合は $20 \sim 30 \text{ GHz}$ 程度である。

このビート信号 bt の周波数が一定値となるように、位相同期ループ (PLL) の技術を用いて被安定化光周波数可変発振器 110 を制御するのが、オフセットロック信号発生部 150 である。ビート信号 bt の位相と、マイクロ波周波数シンセサイザ (発振器) 151 の出力する基準信号 ss の位相とが、位相比較器 152 で比較される。ここで、ビート信号 bt の周波数 fb と基準信号 ss の周波数 f とが異なっていると、位相は周波数の積分値であるので、位相比較器 152 で検出される位相差は、単調に増加もしくは減少する。したがって、検出された位相差を、ループフィルタ 153 を通じてオフセットロック信号 os として被安定化光周波数可変発振器 110 へフィードバックすることにより、位相差は常に一定に保たれ、結果として両レーザの光周波数は相対的にオフセットロックされる。ここで、半導体レーザ特有の大きな位相雑音 (例えば、スペクトル線幅にして 20 MHz 程度)

-7-

に対処するため、位相比較器 152 は、広い位相比較可能範囲を有することが必要である。例えば、前述した K. Kuboki 等の報告では、 $\pm 4096 \pi$ の位相差までを検出可能な、デジタル回路により構成された位相比較器が用いられている。なお、ループフィルタ 153 は、応答特性を決定したり、不必要的雑音を除去する働きをする。

一方、参照光 1d からビームスプリッター 131b で分岐された検出光 1d は、誤差信号発生部 160 の光周波数弁別手段 161 に入射される。すなわち、検出光 1d は、光周波数基準となるファブリーペロー干渉計 161a に入射され、その出力光強度が受光器 161b で検出されて、検出電圧 dv として出力される。この検出電圧 dv は、定電圧源 164 の電圧を可変抵抗器 165 で適当に分圧した参照電圧 rv と、差動増幅器 166 で比較される。そして、この両電圧の差は、PID (比例・積分・微分) 制御器 163 を介して、誤差信号 es として参照光周波数可変発振器 120 にフィードバックされる。ここで、PID 制御器 163 は、入力

-8-

電圧に対して、比例・積分・微分の少なくとも一演算を施した電圧を出力する働きをし、参照光周波数可変発振器 120 を制御する際の、応答特性および定常特性を改善するために用いられる。

次に、第 2 図に示す構成の従来例によって、被安定化レーザ 111 の発振周波数を、広い光周波数可変帯域にわたって安定化する際の動作を、第 3 図 (a-1) および (a-2) を用いて説明する。第 3 図 (a-1) は、ファブリーペロー干渉計 161a と受光器 161b とからなる光周波数弁別手段 161 の特性を示す図であって、横軸が入射される検出光 1d の光周波数、縦軸が検出電圧 dv である。例えば約 5 cm 間隔のファブリーペロー干渉計を用いれば、周期間隔 $\Delta \nu$ が 3 GHz の周期的光周波数弁別特性が得られる。ここで、検出光 1d は参照光 1d から構成されるので、横軸は参照光 1d の光周波数 ν_r に相当する。したがって可変抵抗器 165 を調整して参照電圧 rv を適当な値 (例えば検出電圧 dv の最大値の半分) に設定すれば、検出電圧 dv が参照電圧 rv と等しくなるように、前述し

-9-

-463-

-10-

た誤差信号 es によって参照光周波数可変発振器120がフィードバック制御され、参照光 rld の光周波数 ν_r は特定の値に安定化される。この場合、安定化する光周波数は、図中の黒丸で示した光周波数基準値($\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_N, \dots$)の内から選ぶことが出来る。

一方、被安定化光 ld の光周波数 ν は、オフセットロック信号発生部150の前述した働きにより、参照光 rld の光周波数 ν_r にオフセットロックされている、基準信号 ss の周波数を ν とすれば、

$$\nu = \nu_r \pm f \quad \dots \dots \quad (1)$$

となっている。このため、参照光 ν_r が上述した光周波数基準値 ν_n ($n = 0, 1, \dots, N, \dots$)に安定化されていれば、結局、被安定化光 ld の光周波数は、

$$\nu = \nu_n \pm f \quad \dots \dots \quad (2)$$

に安定化される。ここで、基準信号 ss の周波数 ν は、例えれば前述したK. Kuboki等の文献に示されているように、0.08~1.3 GHz程度の範囲で変化させることが出来る。したがって、第3図(a-2)に示す様に、参照光 rld を安定化する光周

-11-

光周波数弁別手段161の出力する検出電圧 dv を、可変抵抗器165で設定される参照電圧 rv と比較して誤差信号 es を得るという検出方式を用いている。このため、光周波数基準値 ν_n が、ファブリ-ペロー干渉計161aの透過特性だけで決定されないという、重大な問題が存在する。すなわち、光周波数基準値 ν_n は、第3図(b-1)に例示するように、参照電圧 rv の設定値にも依存する。これは、明らかに、光周波数の設定精度を制限する要因となる。

同様に、上述した従来例の誤差信号検出方式では、参照光 rld の光強度変化が、光周波数基準値 ν_n の設定精度および安定度に、直接影響を与える。すなわち、第3図(b-2)に例示するように、検出光 ld の光強度が減少すると、光周波数基準値が ν_n から ν_n' に変化してしまう。例えば、ファブリ-ペロー干渉計161aのフィネスを100、フリースペクトルレンジ(FSR)を3 GHzと仮定し、初期状態での検出電圧 dv の最大値の1/2を安定点として設定した場合、概算して10%の

波数基準値 ν_n を適当に選び、かつ基準信号 ss の周波数 ν を変化させることによって、50 GHzを越える様な広い光周波数範囲にわたって、ほぼ任意の光周波数値に被安定化半導体レーザの発振周波数を安定化することが可能となっている。

「発明が解決しようとする課題」

しかしながら、上記従来例では、被安定化半導体レーザの周波数設定精度及び安定度が著しく制限されるとともに、場合によっては安定化可能な光周波数範囲が制限されてしまう。これを以下に詳述する。

上述した周波数設定精度及び安定度は、主として

(1)参照光 rld の光周波数 ν_r を、光周波数基準であるファブリ-ペロー干渉計161aに安定化する際の、周波数設定精度及び安定度

(2)光の周波数基準自体の精度及び安定度によって制限され、それについて、以下に説明するような制限要因が存在する。

まず、上記(1)に関して、上述した従来例では、

-12-

強度変化当たり、1.5 MHz程度の誤差が生じてしまう。一般に、半導体レーザの出力には、長期的にみて数%以上の光出力変動が存在し、さらに注入電流を変化させて光周波数を変化させた場合には、光出力強度も同時に変化する。例えれば前述したK. Kuboki等の報告においては、発振周波数を50 GHz変化させた場合に、光強度は50%も変化している。このため、1 MHz以下の設定精度及び安定度を実現するのは、はなはだ困難である。

さらに同検出方式は、受光器161bと差動増幅器166の雑音、特に1/f雑音による大きな直流ドリフトが、誤差信号 es に直接影響を与えるため、検出可能な最小周波数誤差が制限される。すなわち、誤差信号 es の検出感度が低い。このため、やはり周波数設定精度および安定度は、著しく制限される。例えれば、H. Yasaka等は、本検出方式によって安定化しても、なお5分間で10 MHz程度のドリフトが観測されたことを報告している(Electronics Letters, 8th Oct. 1987, vol.

-13-

-464-

-14-

28, No. 21, pp. 1161-1162)。

また、上記(2)に関しては、次の重大な問題がある。すなわち、上述した従来例においては、誤差信号検出感度が低いため、光周波数基準として、原子・分子の吸収スペクトルを利用するすることが事实上不可能である。一般に、光学的干渉計(もしくは共振器)の絶対周波数安定度は、半導体レーザの発振光周波数の安定度に比べておよそ1桁以上優れています。温度安定化等により、数分間隔ではMHzオーダーの安定度を達成できます。しかしながら、長期的には、さまざまな外因環境の変動等により、例えば1年あたり数十MHz以上の基準周波数変動が生じてしまう。これに対して、1.5 μm帯にあるアセチレン分子気体の吸収スペクトルやクリプトン原子の光ガルバノスペクトル、1.3 μm帯にあるアルゴン原子の光ガルバノスペクトル、0.78 μm帯にあるルビジウム原子の吸収スペクトル等は、長期的な基準周波数変動も数MHz以下と考えられ、光周波数基準として、光学的干渉計よりも格段に優れている。しかしながら

-15-

に、温度等様々な外因環境による影響を受け易くなり、長期的な安定度を制限する要因ともなり得る。

さらに、前述したような原子・分子の吸収スペクトルを利用して、高い周波数安定度を実現しようとした場合には、通常は特定の光周波数基準値にしかスペクトルが存在しないため、安定化可能な光周波数範囲が、まさに周波数fの可変範囲によって、例えば4GHz程度に制限される。

本発明の目的は、上記問題点に鑑み、安定化に際しての光の周波数基準値が、参照電圧や光強度によらずに光周波数基準のみによって決定され、しかもその周波数基準値を高い感度で検出する誤差信号検出方式を有するとともに、原子・分子の吸収スペクトルといった優れた光の周波数基準を用いた場合でも、広い光周波数範囲にわたって、高い精度での安定化が実現出来る、優れた半導体レーザの発振周波数安定化装置を提供することにある。

「課題を解決するための手段」

ら、一般にこれらのスペクトルは、ドップラー拡がりによって数百MHzに広がっているため、これを光周波数弁別特性として利用した場合の弁別感度は、ファブリーペロー干渉計の透過特性を利用する場合に比べて、少なくとも数百分の1にとどまる。以上のような理由により、上述した従来の誤差信号検出方式では、十分な安定化をおこなうことが出来ない。

また、上述した従来例においては、半導体レーザ特有の大きな位相雑音に対処するために位相比較器152を複雑なディジタル回路で構成しているが、このために、基準信号ssの周波数fの可変幅が、たかだか数GHzに制限される。この場合、第3図(a-2)より明らかなように、ファブリーペロー干渉計161aの周波数透過特性の周期を、例えば3GHz程度に設定しなければ、任意の光周波数値で安定化することが出来ない。しかしながら、狭い周波数間隔を実現するには、干渉計の光路長差を大きくする必要があり、装置の小型化に不利である。さらに、干渉計が大きくなるため

-16-

本発明は、上記目的を達成するため、被安定化半導体レーザからなる被安定化光周波数可変発振器の出力周波数と、参照レーザからなる参照光周波数可変発振器の出力周波数とをオフセットロッキングする際に、ビート信号の周波数を変換するための、局部発振器とミキサとからなる、少なくとも1段の周波数変換部を備えるとともに、前記局部発振器もしくはオフセットロック信号検出用の基準信号を発生する基準発振器に位相連続周波数変調を施すための、繰り返し信号を発生する変調信号発振器と、該繰り返し信号を用いて、光の周波数弁別手段が outputする検出信号から誤差信号を検出する同期検出手段とを備え、かつ前記オフセットロック信号を前記参照光周波数可変発振器の制御に用い、一方、前記誤差信号を前記被安定化光周波数可変発振器の制御に用いたことを、その最も主要な特徴とする。

「作用」

本発明によれば、ビート信号検出信号によって検出された、被安定化半導体レーザと参照レーザ

との発振光周波数の差で電気的に振動するビート信号は、まず少なくも1段の周波数変換部に入力される。周波数変換部では、入力信号はミキサに入力され、局発信号によって周波数変換された中間周波数信号が出力される。しかる後に、この中間周波数信号をオフセットロック信号発生部に入力し、基準信号と位相比較することにより、2台の半導体レーザの発振周波数をオフセットロッキングするためのオフセットロック信号が検出され、参照レーザからなる参照光周波数可変発振器にフィードバックされる。ここで、周波数変換部の局発信号の周波数を変化させることにより、オフセットロック信号発生部の位相比較手段への入力(中間周波数信号)の周波数を低く保ったまま、広い周波数範囲での周波数オフセットロッキングが可能となる。

また、変調信号発振器の供給する繰り返し信号により、基準信号もしくは局部発振信号には位相連続周波数変調が施され、この結果オフセットロック信号を介して参照レーザの出力光が周波数変調

-19-

いて既にJ. L. Hall等により、1988年のJournal of Quantum Electronics誌第23巻の427-437頁に記載されている。本発明は、半導体レーザの周波数オフセットロッキングにこの手法を応用し、かつ基準信号もしくは局発信号に位相連続周波数変調を施すことにより、参照レーザを周波数変調して光周波数基準から誤差信号を同期検出するという手法を新たに加えることにより、従来例では到底実現不可能である、高い周波数安定度および設定精度を有する半導体レーザの発振周波数安定化装置を供するものとも言える。

「実施例」

以下、図面を参照して本発明の実施例について説明する。

第1図は、本発明による半導体レーザの発振周波数安定化装置の第1実施例の構成を示す図である。第1図において、10は被安定化光周波数可変発振器、20は参照光周波数可変発振器、31は光合分波手段、32はビート信号検出手段、40は1段の周波数変換部、50はオフセットロッ

される。すなわち、参照レーザの発振周波数の平均値(中心値)が、被安定化レーザの発振周波数にオフセットロックされた状態で、参照レーザの出力光に、周波数変調が施される。

一方、この参照レーザの出力光を含んだ検出光が、光合分波手段によって取り出され、光周波数弁別手段に入射される。この結果得られる検出信号は、同期検波手段に入力され、前記繰り返し信号によって、誤差信号が同期検出される。このような光周波数変調と同期検波技術の組合せによって、光周波数基準の周波数弁別特性の微分特性が高い感度で検出される。

そしてこの誤差信号を、被安定化半導体レーザからなる被安定化光周波数可変発振器にフィードバックすることにより、光周波数基準のみに依存した光周波数基準値を利用した、高い精度での発振周波数の安定化が可能となる。

なお、ミキサを含む周波数変換部を備えることによってオフセットロッキング可能な周波数範囲を拡大する方法は、ガスレーザを用いた場合につ

-20-

ク信号発生部、60は誤差信号発生部、71は変調信号発振器である。

被安定化光周波数可変発振器10は、内包される被安定化半導体レーザの発振周波数 ν が、後述する誤差信号ESの入力に基づいて、後述する設定光周波数値 ν_s と等しくなるように制御される光周波数可変発振器であり、例えば、光周波数 ν_s 近傍の単一縦モードで発振する被安定化DBRレーザ11と、被安定化DBRレーザ11の温度を一定値に保つ温度制御装置12と、被安定化DBRレーザ11の出力である被安定化光LDを透過する一方で、後段よりの反射光を極力遮断する光アイソレータ13と、誤差信号ESの入力および後述するバイアス設定信号BSの入力に基づいて、被安定化DBRレーザ11に、その発振周波数 ν を設定光周波数値 ν_s と等しくなるように制御した制御電流を供給する制御電流注入装置14と、被安定化DBRレーザ11を発振させるための注入電流を供給する電流注入装置15と、バイアス設定信号BSを供給するバイアス設定装置16と

-21-

-466-

-22-

から構成されている。

参照光周波数可変発振器 20 は、内包される参照レーザの発振周波数 ν_r が、後述するオフセットロック信号 OS の入力に基づいて、被安定化光周波数可変発振器 10 の出力する被安定化光 LD の光周波数 ν と所定の周波数差となるようにオフセットロックされる光周波数可変発振器であり、例えば、光周波数 ν_r で発振する参照 DBR レーザ 21 と、参照 DBR レーザ 21 の温度を一定値に保つ温度制御装置 22 と、参照 DBR レーザ 21 の出力である参照光 RL D を透過する一方で、後段よりの反射光を極力遮断する光アイソレータ 23 と、オフセットロック信号 OS の入力に基づいて、参照 DBR レーザ 21 に、その発振周波数 ν_r がオフセットロックされるように制御した制御電流を供給する制御電流注入装置 24 と、参照 DBR レーザ 21 を発振させるための注入電流を供給する電流注入装置 25 とから構成されている。

光合分波手段 31 は、被安定化光 LD と参照光 RL D を入力し、被安定化光の一部からなる被安

定化光出力と、少なくとも参照光 RL D の一部を含む検出光 LD D を出力し、さらに、被安定化光 LD の一部と参照光 RL D の少なくとも一部とを、偏波状態が極力一致した状態で混合した混合光 MLD をも出力するもので、例えば、被安定化光 LD を入力して 2 分岐する第 1 の光分岐手段、例えば光カプラ 31a と、参照光 RL D を入力して 2 分岐する第 2 の光分岐手段、例えば光カプラ 31b と、光カプラ 31a の一の分岐光と光カプラ 31b の一の分岐光とを合波する光合波手段、例えば光カプラ 31c とから構成されている。

ビート信号検出手段 32 は、光合分波手段 31 の出力する混合光 MLD を入力し、光電変換により、被安定化光 LD の光周波数 ν と参照光 RL D の光周波数 ν_r の差周波数で電気的に振動するビート信号 BT を検出して出力する手段で、例えば、入力光強度に応じた光電流出力を生じる受光器 32a と、増幅器 32b とから構成されている。

周波数変換部 40 は、例えば周波数 $f = 10\text{ GHz}$ 程度の局発信号 LS を供給する局部発振器、

- 23 -

例えばマイクロ波周波数シンセサイザ 41 と、局発信号 LS により、ビート信号 BT を周波数ダウントリコバートした中間周波数信号 IF を発生するミキサ、例えばダブルバランスミキサ 42 と、中間周波数増幅器 43 とから構成されている。

オフセットロック信号発生部 50 は、例えば中心周波数 $f_{r0} = 260\text{ MHz}$ 程度で、かつ後述する繰り返し信号 RS の入力により、例えば周波数偏位 $\Delta f = 10\text{ MHz}$ 程度の位相連続周波数変調を施された基準信号 SS を供給する基準発振器、例えば直接周波数シンセサイザ 51 と、入力される中間周波数信号 IF の位相と、基準信号 SS の位相とを、例えば $\pm 120\pi$ の範囲で比較可能なデジタル回路で構成された位相比較器 52 と、例えばローパスフィルタとラグリードフィルタとを組み合わせたループフィルタ 53 とから構成されている。

誤差信号発生部 60 は、光設定周波数値 ν_s の近傍に光周波数基準値 ν_{r0} で極大もしくは極小となる光周波数弁別特性を有する、例えば導波路型

- 24 -

リング共振器(光周波数基準) 61a と受光器 61b とから構成される光周波数弁別手段 61 と、光周波数弁別手段 61 に、前記光合分波手段 31 の出力する検出光 LD D を入力して検出される検出信号 DS から、繰り返し信号 RS と同期した成分を検出する同期検波手段、例えばロックインアンプ 62 と、該同期検波手段により検出された信号の入力により、誤差信号 ES を出力する PID 制御器 63 とから構成されている。

変調信号発振器 71 は、前記直接周波数シンセサイザ 51 と前記ロックインアンプ 62 とに、例えば周波数 $f_m = 1\text{ kHz}$ 程度の繰り返し信号 RS を供給する手段である。

次に、上記構成による、半導体レーザ(被安定化 DBR レーザ 11)の発振周波数安定化の動作を説明する。なお、オフセットロック信号発生部 50 による参照光周波数可変発振器 20 の制御帯域(ループ帯域)は、繰り返し信号 RS の周波数 f_m より大きく、例えば 10 kHz 以上に設定され、また、誤差信号発生部 60 による被安定化光周波数

可変発振器 10 の制御帯域は、周波数 f_m より小さく、例えば 100 Hz 程度以下に設定されているものとする。

まず、被安定化光周波数可変発振器 10 および参照光周波数可変発振器 20 の動作を説明する。被安定化 DBR レーザ 11 および参照 DBR レーザ 21 は、それぞれの活性層領域に電流注入装置 15 および 25 を用いて電流を注入することにより、単一縦モードで発振する。ここで、それぞれのレーザの温度揺らぎは、温度制御装置 12 および 22 で、例えば 1/100 度程度に抑えられている。一方、それぞれのレーザの分布反射層(DBR)領域には、制御電流注入装置 14 および 24 により、適当にバイアスされた制御電流が注入されている。ここで、上記制御電流注入装置 14 および 24 は、誤差信号 ES およびオフセットロック信号 OS の入力に応じて、それぞれの制御電流を変化させる。さらに制御電流注入装置 14 は、バイアス設定装置 16 の出力するバイアス設定信号 BS の入力によっても、その出力する制御電流

を変化させる。

一般に、単一縦モードで発振している DBR レーザの発振光周波数は、DBR 領域への制御電流の注入量によって例えば 1 GHz/mA 程度の割合で変化し、かつその制御特性(周波数変調特性とも呼ばれる)は 100 MHz 以上まで平坦で、しかも位相回転が生じない(例えば、IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.QE-23, No.6, pp. 835-838, 1987, S. Murata et al., "Spectral Characteristics for a 1.5 μm DBR Laser with Frequency-Tuning Region." 参照)。したがって、光アイソレータ 13 を介して取り出される被安定化光 LD の光周波数 ν_L と、光アイソレータ 23 を介して取り出される参照光 RL D の光周波数 ν_R は、それぞれ、誤差信号 ES およびオフセットロック信号 OS により制御される。

被安定化光 LD および参照光 RL D は、光カプラ 31a および 31b によってそれぞれ 2 分岐され、それぞれの一の分岐光が光カプラ 31c に出力されて合波され、混合光 MLD として出力される。

-27-

一方、光カプラ 31b の他の分岐光は、検出光 DLD として、誤差信号発生部 60 の光周波数弁別手段 61 に出力される。

ビート信号検出手段 32 では、光カプラ 31c の一の出力である混合光 MLD が、受光器 32a で受光され、光電変換により生成された周波数 f_b のビート信号 BT が、增幅器 32b で増幅されて周波数変換部 40 のダブルバランストミキサ 42 に出力される。なお、ビート周波数 f_b は、被安定化光 LD の光周波数 ν_L と、参照光 RL D の光周波数 ν_R の差で与えられる。

周波数変換部 40 では、ダブルバランストミキサ 42 において、周波数 f_b のビート信号 BT の入力が、マイクロ波周波数シンセサイザ 41 の供給する周波数 f の局発信号 LS によって、周波数 $f_{IF} = |f_b - f|$ の中間周波数信号 IF に変換され、中間周波数增幅器 43 で増幅されて、オフセットロック信号発生部 50 の位相比較器 52 に出力される。なお、中間周波数增幅器 43 は、ダブルバランストミキサ 42 において発生するイメージ信

-28-

号を除去するフィルタの働きも、合わせ持つ。

オフセットロック信号発生部 50 では、中間周波数信号 IF の入力が、直接周波数シンセサイザ 51 の供給する周波数 f_{IF} の基準信号 SS と、位相比較器 52 で位相比較される。その位相差は、ループフィルタ 53 を介して、オフセットロック信号 OS として参照光周波数可変発振器 20 にフィードバックされる。ここで、中間周波数信号 IF の周波数 f_{IF} と、基準信号 SS の周波数 f_{IF} とが異なっていると、位相は周波数の積分値であるので、位相比較器 52 で検出される位相差は、単調に増加もしくは減少していく。したがって、この位相差に基づくオフセットロック信号 OS によって、参照光 RL D の光周波数 ν_R をフィードバック制御することにより、その光周波数値は、被安定化光 LD の光周波数 ν_L と、ある一定値だけ異なった値に、周波数誤差なく安定化される。すなわち、光周波数 ν_R が、オフセットロックされる。ここで、このフィードバックループにおける光ロックレンジは、ループフィルタ 53 に積分特性を付加

-29-

—468—
Patent provided by Sughrue Mion, PLLC - <http://www.sughrue.com>

-30-

するなどすることにより、例えば 100 GHz 程度以上に出来る。すなわち、被安定化光 LD の光周波数 ν が 100 GHz 变化しても、オフセットロックした状態を保つことが可能である。

一方、直接周波数シンセサイザ 51 の供給する基準信号 SS の周波数 f_r には、変調信号発振器 71 の供給する周波数 f_m の繰り返し信号 RS により、周波数偏移 Δf_r の位相連続周波数変調が施され、その平均周波数が、 f_{r0} となっている。したがって、参照光 RL D の周波数 ν_r には、変調周波数 f_m 、周波数偏移 Δf_r の周波数変調が施され、かつその中心周波数 ν_{r0} は、被安定化光 LD の光周波数 ν とある一定値だけ異なる値に安定化されている。

第4図は、上述した一連の光周波数オフセットロックング動作によって制御された、参照光 RL D の光周波数配置を説明するための図である。すなわち、例えば、第4図の①は、被安定化光 LD の光周波数 ν が参照光 RL D の光周波数 ν_r よりも大きく、かつ両光の差周波数に相当するビート周波数 f_b が、周波数変換部 40 における局発信号

- 31 -

一ペロー干渉計と同様な周期的な光周波数弁別特性を与えるので、光周波数弁別手段 61 は、第3図(a-1)と同様な周期的周波数弁別特性を示す。そして、周波数変換部 40 の局発信号 LS の周波数 f を変化させるか、あるいは被安定化光周波数可変発振器 10 の DC 電流設定装置 16 の出力するバイアス設定信号 BS により光周波数 ν を変化させることによって、検出光 DLD の光周波数 ν_r は、光周波数弁別手段 61 の弁別特性が極大となる、適当な光周波数値 ν_{on} (光周波数基準値) の近傍に設定することが出来る。

この状態で、ロックインアンプ 62 は、検出信号 DS を、変調信号発振器 71 の供給する周波数 f_m の繰り返し信号 RS で同期検波する。これにより、光周波数弁別手段 61 の与える光周波数基準値 ν_{on} と、参照光 RL D の中心光周波数 ν_{r0} との周波数差に応じた出力が PID 制御器 63 に出力され、被安定化光周波数可変発振器 10 の光周波数 ν を安定化するための誤差信号 ES が得られる。

第5図は、上記した一連の光周波数 ν の安定化

LS の周波数 f よりも大きい状態でオフセットロックされた場合の、光周波数配置を示している。この場合、参照光 RL D の光周波数 ν_r には、周波数変調が施され、かつその中心周波数 ν_{r0} が、 $\nu - f - f_{r0}$ に安定化されている。

なお、第4図①および④の状態にロックされるか、あるいは第4図②および③の状態にロックされるかは、オフセットロック信号 OS による光周波数 ν_r のフィードバック制御の向きにより一意に決定され、かつビート信号 BT の周波数 f_b を観測することにより、例えば、①と④のどちらの状態にオフセットロックされているかを判別することが可能である。

一方、誤差信号発生部 60 の動作は、以下のように説明される。

第1図において、光カプラ 31b の他の分歧光からなる検出光 DLD は、導波路型リング共振器 61a に入射され、その出力光が受光器 61b に導かれ、光電変換による検出信号 DS を生じる。ここで、導波路型リング共振器 61a は、ファブリ

- 32 -

動作例を、原理的に示した図である。ここでは、第4図③に示した状態で光周波数のオフセットロックングがかかっている場合を想定している。被安定化 DBR レーザ 11 の発振周波数 ν は、周波数基準値 ν_{on} 、局発信号 LS の周波数 f 、および基準信号 SS の中心周波数 f_{r0} を用いて、

$$\nu_s = \nu_{on} - f - f_{r0} \quad \dots \dots \quad (3)$$

で与えられる、設定光周波数値 ν_s が安定化される。すなわち、第5図(a)に示すように、被安定化 DBR レーザ 11 の発振周波数 ν が、 $\nu_{on} - f - f_{r0}$ ($= \nu_s$) よりも小さい場合、同図中 DSa で示す検出信号が光周波数弁別手段 51 で検出され、これに基づく誤差信号は、同図中 ESa で示すような、例えばマイナス (-) の信号となる。従って、制御電流注入装置 14 は、被安定化 DBR レーザ 11 の発振周波数 ν が増加するように制御する。

また、第5図の(b)に示すように、発振周波数 ν が、設定光周波数値 $\nu_{on} - f - f_{r0}$ ($= \nu_s$) よりも大きい場合、同図中 DSb で示す検出信号が光周波数弁別手段 51 で検出され、これに基づく誤

- 33 -

-469-

- 34 -

差信号は、同図中 E S b で示すような、例えばプラス(+)の信号となる。従って、制御電流注入装置 14 は、被安定化 D B R レーザ 11 の発振周波数 ν が減少するように制御する。

そして、第 5 図の(c)に示すように、発振周波数 ν が設定光周波数値 $\nu_{on} - f - f_{ro} (= \nu_s)$ に等しくなれば、同図中 D S c で示す検出信号が光周波数弁別手段 51 で検出され、これに基づく誤差信号は、同図中 E S c で示すような、「± 0」の信号となる。従って、このとき、被安定化 D B R レーザ 11 の発振周波数 ν はそのままの状態に保たれる。

以上説明したように、上述した第 1 実施例によれば、基準信号 S S に位相連続周波数変調を施すことにより、参照光周波数可変発振器 20 を周波数変調し、周波数変調された参照光 R L D から分岐された検出光 D L D を用いて、光周波数弁別手段 61 から誤差信号 E S を同期検出するため、導波路型リング共振器 61 a のみ依存した光周波数基準値を、しかも高い感度で検出することが可能

となり、高い周波数安定度や設定精度が実現出来る。

なお、上述した周波数変調光と同期検出方式の組合せによれば、例えば Y. C. Chung により 1989 年の PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS 誌第 1 卷の 135-136 頁に報告されているような、分子・原子のスペクトルという優れた光周波数基準からも誤差信号 E S を検出出来るため、より高い精度での周波数設定や安定化が可能となる。

また、上述した第 1 実施例においては、参照レーザからなる参照光周波数可変発振器 20 をオフセットロックする際に、ビート信号 B T の周波数を、局発信号 L S を用いて周波数変換(ダウンコンバート)してから、オフセットロック信号発生部 50 に加えるため、局発信号 L S の周波数 f を、例えば 10 GHz 程度変化させることにより、比較的低速なディジタル回路により構成された位相比較器 52 への入力周波数を、例えば 260 MHz 程度に保ったまま、10 GHz 以上の広い周波数範囲で、被安定化光と参照光の光周波数差を設定

することが可能となる。これにより、第 3 図(a-2)に示した原理によって、広い周波数可変帯域内の任意の周波数値への安定化を可能とするためには、導波路型リング共振器 61 a の共振間隔 $\Delta \nu$ は、例えば 10 GHz に設定すればよい。このため、リング共振器 61 a は、 $\Delta \nu$ が 3 GHz のものに比べて約 1/3 に小型化される上、これにより、高い精度での温度安定化等が容易に実現出来るようになる。こうして、やはり周波数安定度や設定精度の向上が可能となる。

さらに、前記した様な、原子・分子の吸収スペクトルといった光周波数基準を光周波数弁別手段 61 に用いた場合には、その安定化可能な光周波数の範囲は、被安定化光 L D と参照光 R L D の周波数差に限定される。したがって、上述した周波数変換部 40 の働きにより、安定化可能な光周波数の範囲が、10 GHz 以上に拡大されることになる。

さらに、同第 1 実施例は、局発信号 f の周波数を掃引することで、光周波数を掃引させることも

可能で、光周波数スイーパとしても応用可能である。

なお、同第 1 実施例において、光カプラ 31 c において合波する際には、両光の偏波状態が極力一致するように注意する必要があり、光配線および光合分波手段 31 は、偏波保持ファイバおよび偏波保持カプラを用いて構成することが望ましい。しかしながら、通常のシングルモードの光ファイバおよび光ファイバカプラを用いても、その光配線の全長を例えば 1 m 以内程度に抑え、かつ安定な環境下に収納することにより、最初に偏波が一致するように調整して光配線することだけでも、十分に対処可能である。もちろん、ハーフミラーを組み合わせて、光空間配線を行なってもよい。

また、同第 1 実施例において、被安定化光周波数可変発振器 10 および参照光周波数可変発振器 20 を構成する半導体レーザとして、2 電極型の D B R レーザを用いたが、これに限定されるものではなく、多電極 D F B レーザや、3 つ以上の電極もしくは領域を有する D B R レーザ、あるいは、

外部鏡構造を有する半導体レーザなどを用いてもよい。この場合、電流注入装置 15 と制御電流注入装置 14 は、実際の被安定化レーザの電極構成によって、数が複数になったり、あるいは両者の役目を兼ね備えたものが利用される。また、参照光周波数可変発振器 20 にも、被安定化光周波数可変発振器 10 のバイアス設定装置 16 と同様な装置を設けることにより、周波数オフセットロッキング動作を、より簡便に開始することも可能である。さらに、被安定化光の光周波数 ν を設定光周波数値 ν_s に近づける際には、温度制御装置 12 を用いて被安定化 DBR レーザ 11 の温度を変化させてもよく、またこの際に、参照 DBR レーザの温度も、同時に温度制御装置 22 を用いて変化させてもよい。

また、同第 1 実施例においては、光周波数弁別手段 61 を、導波路型リング共振器 61a と受光器 61b で構成したが、これに限定されるものではなく、ファブリーベロー干渉計や、アセチレン分子もしくは他の分子や原子の気体を封入したセ

ルなど、その透過もしくは反射特性が、特性の光周波数において極大もしくは極小を示す光周波数基準と、受光器との組み合わせを用いてもよく、また、クリプトン原子の光ガルバノスペクトルのように、放電気体中に検出光 LD を照射した場合の放電電流を検出信号 DS とするような光周波数弁別手段を利用しても勿論よい。

また、同第 1 実施例においては、ビート信号検出手段 32 を、ビート信号 BT を増幅する増幅器 32b を含めて構成しているが、これは必ずしも必要不可欠な構成要素ではなく、受光器 32a で検出されるビート信号 BT が、雑音に対して十分大きければ、省略することが可能である。同様に、中間周波数増幅器 43 も、ダブルバランスミキサ 42 で検出される中間周波数信号 IF が十分大きく、かつ発生するイメージ信号が位相比較器 52 の入力帯域外であれば、省略することが可能である。さらに、誤差信号発生部 60 の PID 制御器 63 も、例えば比例係数 1 の比例制御のみを行なう場合には、省略される。

- 39 -

また、同第 1 実施例においては、周波数変換部 40 のミキサとして、ビート信号 BT の周波数 f_b と局発信号 LS の周波数 f の差周波数を有する中間周波数信号 IF を出力するダブルバランスミキサ 42 を用いたが、この代わりに、ビート信号 BT の周波数 f_b と、局発信号 LS の周波数 f の整数倍の周波数 (nf) との差周波数を有する中間周波数信号 IF を出力する、バーモニックミキサを用いてもよい。さらに、ここでは、1 段の周波数変換のみを行なっているが、より高い、あるいは広い周波数範囲をカバーするために、複数段での周波数変換を行なっても勿論よい。

また、同第 1 実施例においては、基準信号 SS に位相連続周波数変調を施しているが、この代わりに、周波数変換部 40 の局発信号 LS に、位相連続周波数変調を施してもよい。

また、同第 1 実施例においては、周波数変換部 40 の局部発振器と、オフセットロック信号発生部 50 の基準発振器は、それぞれ独立な発振器を用いているが、例えば kHz 以下といったきわめて

- 40 -

高い精度でのビート周波数設定が求められる場合には、別の周波数基準発振器に両発振器を同期させることにより、精度を高めることが可能である。

また、同第 1 実施例においては、繰り返し信号 RS の周波数 f_m を 1 kHz 程度、オフセットロック信号発生部 50 による参照光周波数発振器 20 の制御帯域(ループ帯域)を 10 kHz 以上、誤差信号発生部 60 による被安定化光周波数可変発振器 10 の制御帯域を 100 Hz 程度以下として説明したが、これらの数値はおおよその相対的な大小関係を示すために用いたもので、何等これらの周波数値に限定されるものではない。

次に、第 6 図は、本発明による半導体レーザの発振周波数安定化装置の第 2 実施例の構成を示す図である。この第 2 実施例が、前述した第 1 実施例と異なる点は、光合分波手段 31 が、被安定化光 LD を 2 分岐する第 1 の光分岐手段、例えば光カプラ 31a と、該第 1 の光分岐手段の一の分岐光と、参照光 RL とを合波して 2 つの混合光を出力する光合波手段、例えば光カプラ 31d とか

- 41 -

— 471 —

- 42 -

ら構成されていることがある。

次に、このように構成された第2実施例の動作を前述した第1実施例と異なる部分についてのみ説明する。

被安定化光周波数可変発振器10の出力する被安定化光LDは、光カプラ31aで2分岐され、その一の分岐光が、参照光周波数可変発振器20の出力する参照光LDと光カプラ31dで混合される。ここで、両光の偏波状態が、極力一致するように注意する。そして、光カプラ31dの一分岐光が混合光MLDとしてビート信号検出手段32に出力され、一方、他の分岐光が、検出光LDとして誤差信号発生部60に出力される。

ここで、検出光LDには、参照光LDのみならず、被安定化光LDも含まれている。したがって、光周波数弁別手段61から出力される検出信号DSには、被安定化光LDの光周波数 ν に依存した成分も含まれる。しかしながら、繰り返し信号RSによって周波数変調されているのは参照光LDのみであるので、ロックインアンプ62で

-43-

周波数基準のみに依存する光周波数基準値からの誤差信号を、高い感度で同期検出することが可能となる。そして、位相比較から導かれるオフセットロック信号を用いて参照レーザの発振周波数を制御し、一方、前記誤差信号を用いて被安定化半導体レーザ発振周波数を制御することにより、広い光周波数範囲にわたって、高い設定精度および安定度で、被安定化半導体レーザの発振周波数を安定化することが可能となる。また、誤差信号検出感度の改善により、光周波数基準として優れた性能を示す原子・分子のスペクトルの利用が可能となり、かつ周波数変換部の採用により、基準周波数で安定化出来る光周波数範囲が10GHz以上に拡大されることは、特に有効な利点である。

4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明の第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示すブロック図、第2図は従来例による半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示すブロック図、第3図は同従来例による半導体レーザの発振周波数安定

同期検出されるのは、第1実施例と同じく、参照光LDの中心光周波数 ν_0 と、光周波数基準地 ν_{on} との差に対応する誤差信号となる。

このような第2実施例によれば、受光器61bに入射する被安定化光の成分が背景光となるため、誤差信号の検出感度が若干制御されるが、しかし、光合分波手段31を、2つの光カプラで構成することが出来、光回路の簡便化に有効である。なお、この第2実施例においても、第1実施例で説明した本発明の特徴がすべて当てはまることは言うまでもない。

「発明の効果」

以上詳述したように、本発明によれば、周波数変換部を設けてビート周波数を変換することで、基準信号と位相比較する際の位相比較器の動作速度を低く抑えたまま広いビート周波数範囲での光周波数オフセットロックが可能となり、さらに、基準信号もしくは周波数変換部の局発信号に位相連続周波数変調を施すことにより、参照光を周波数変調して、ファブリーペロー干渉計などの

-44-

化動作を説明するための図、第4図は本発明の第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作を説明するための図、第5図は本発明の第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作を説明するための図、第6図は本発明の第2実施例による半導体レーザの発振周波数安定化装置の構成を示す図である。

- 10 ……被安定化光周波数可変発振器、
- 11 ……被安定化DBRレーザ、
- 20 ……参照光周波数可変発振器、
- 21 ……参照DBRレーザ、
- 31 ……光合分波手段、
- 32 ……ビート信号検出手段、
- 40 ……周波数変換部、
- 41 ……マイクロ波周波数シンセサイザ
(局部発振器)、
- 42 ……ダブルバランスミキサ、
- 50 ……オフセットロック信号発生部、
- 51 ……直接周波数シンセサイザ(基準発振器)、

-45-

-472-

-46-

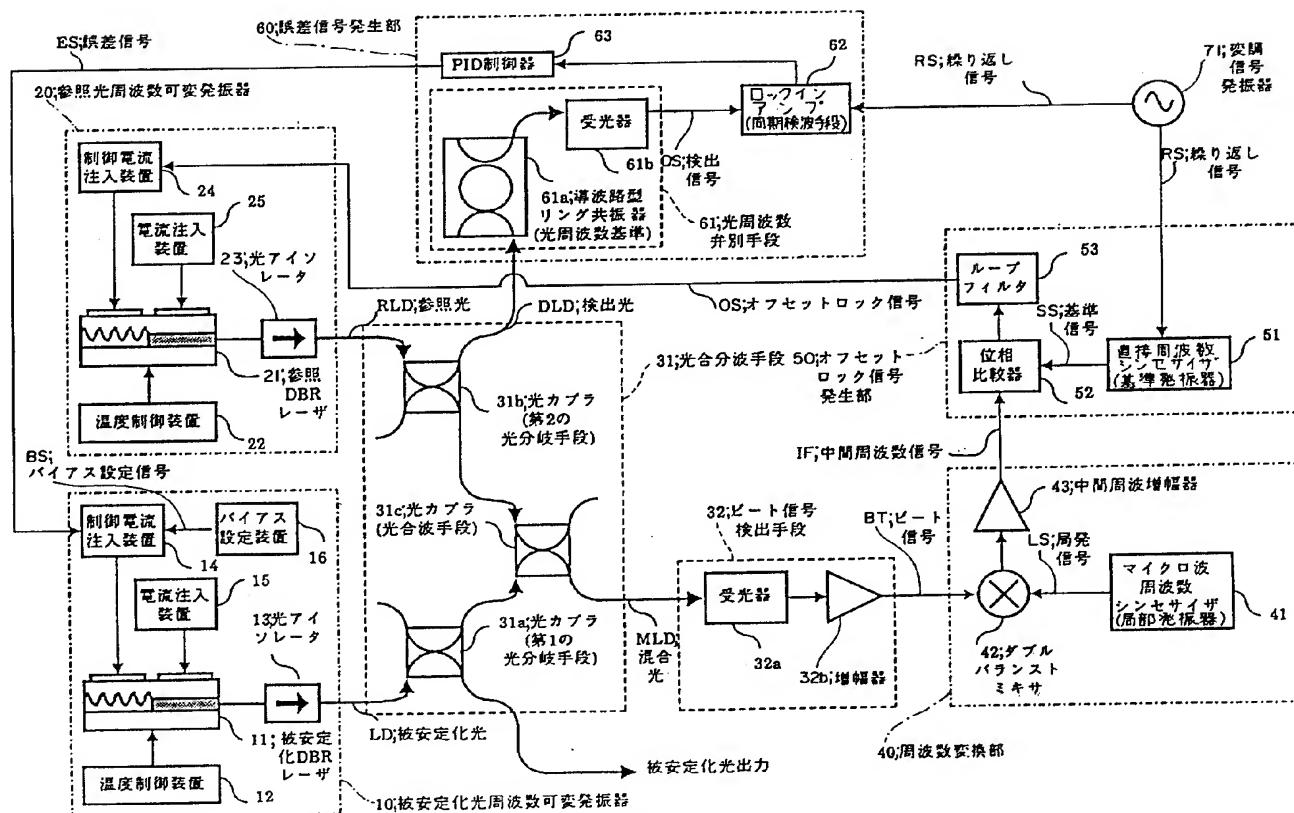
5 2 …… 位相比較器、
 5 3 …… ループフィルタ、
 6 0 …… 誤差信号発生部、
 6 1 …… 光周波数弁別手段、
 6 2 …… ロックインアンプ(同期検波手段)、
 7 1 …… 变調信号発振器。

出願人 日本電信電話株式会社

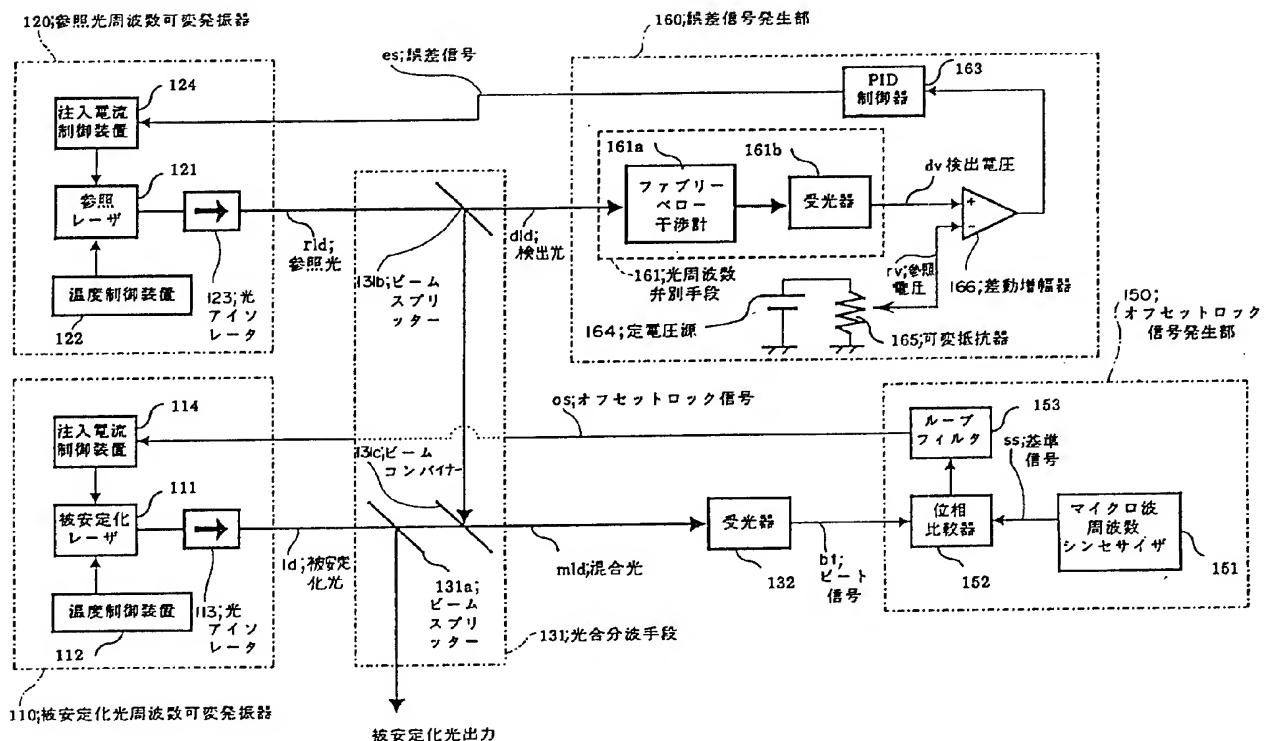
代理人 弁理士 志賀正 武蔵第一
郵便局
印

- 47 -

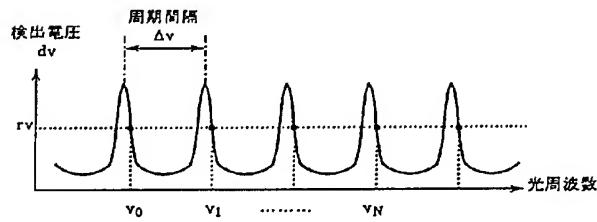
第1図 (第1実施例の構成)



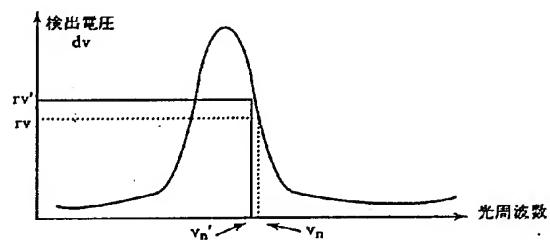
第2図 (従来例の構成)



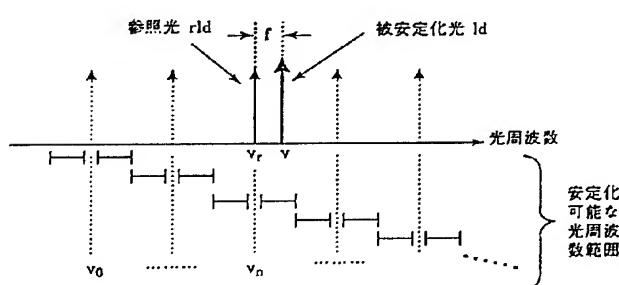
第3図 (従来例による半導体レーザの発振周波数安定化動作の説明)



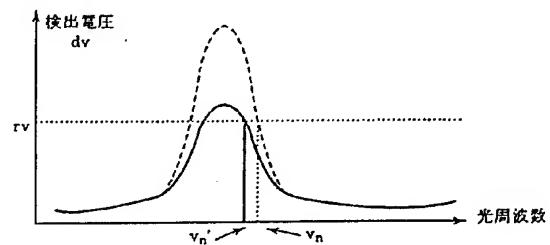
(a-1) 光周波数弁別手段161の特性



(b-1) 比較電圧rvによる設定周波数の変化

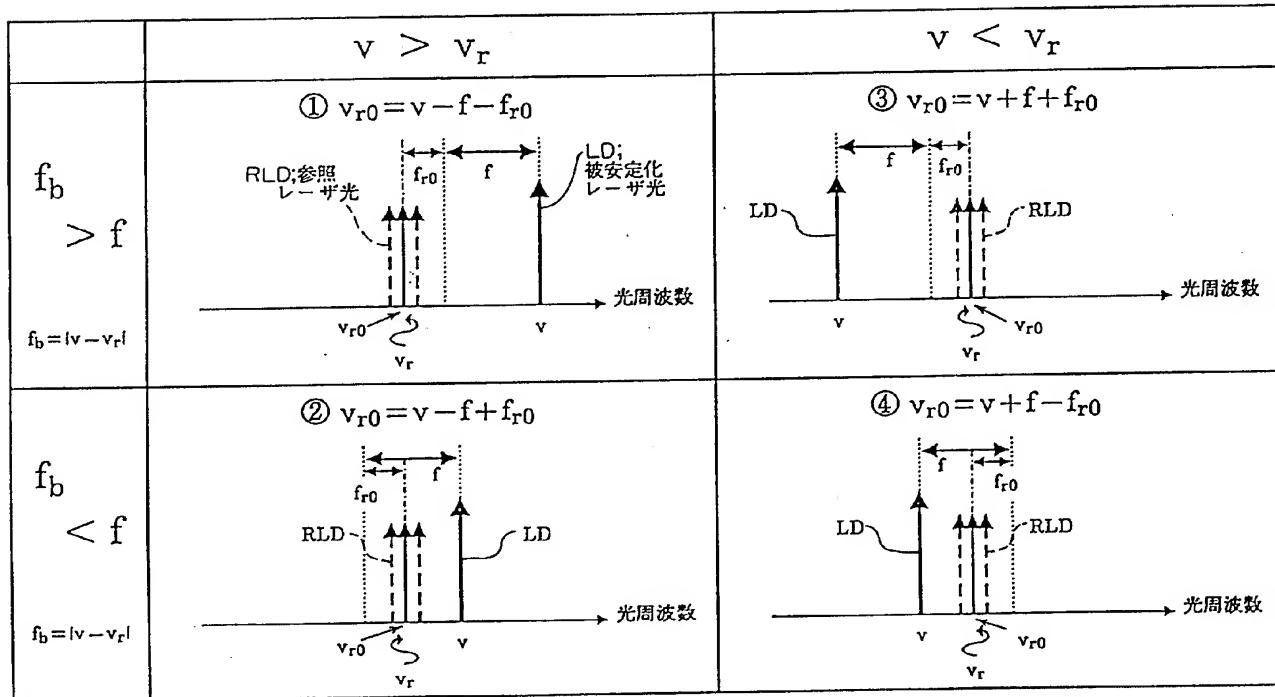


(a-2) 広い周波数範囲での安定化の仕組み

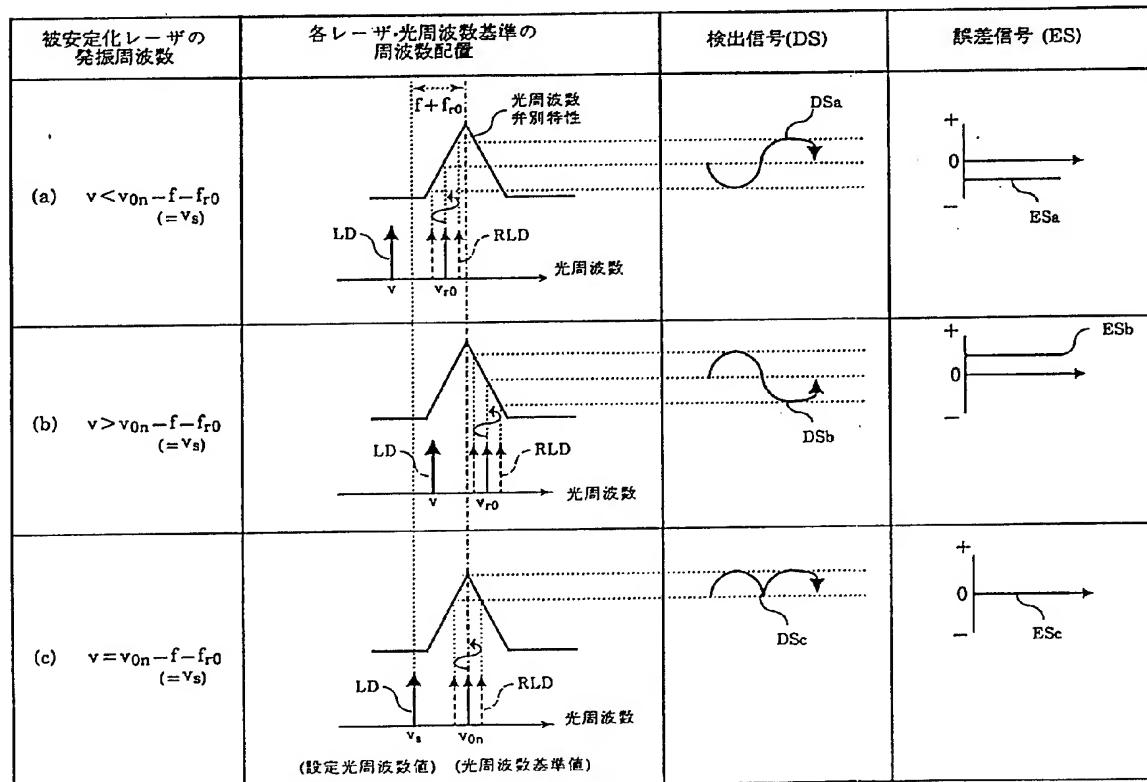


(b-2) 光強度変動による設定周波数のずれ

第4図 (第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作の説明)



第5図 (第1実施例による半導体レーザの発振周波数安定化動作の説明)



第 6 図 (第2実施例の構成)

